

[1009] コンクリートの収縮ひびわれ低減に関する2, 3の検討

正会員 ○ 庄谷征美 (八戸工業大学工学部)

正会員 杉田修一 (八戸工業大学工学部)

正会員 菅原 隆 (八戸工業高等専門学校)

1. はじめに

コンクリートの収縮ひびわれを防止することは、構造物の美観上ばかりでなく、供用寿命の延長といった耐久性向上の面からも有効であろうと思われる。最近我国で開発された、強力な界面活性効果を有しその結果収縮を減少させうる混和剤は、特にその低減効果が顕著であることから、収縮ひびわれ防止策としての利用に極めて大きな期待が持たれている。筆者らは、既に一種類の混和剤に着目した実験により、この種混和剤のひびわれ防止への有用性を確認している¹⁾。しかしながら、今後これらの積極的な活用を計る上で混和剤の種別や、使用量および使用方法の違い、部材拘束度の異なる条件下での効果などを明確にしなければならないと思われる。本研究は、吹き付けコンクリート用ひびわれ低減剤として用いられている1種類を含め計5種類の収縮低減用混和剤を試料として、ペースト供試体による乾燥収縮試験から主にその収縮低減のメカニズムを考察し、さらに、コンクリートを対象とした外部拘束ひびわれ試験²⁾により、混和剤のひびわれ低減性能を調べ、ひびわれ防止手段としての有用性について2, 3の検討を加えたものである。

2. 実験方法

2-1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの実験において用いた細骨材は、陸砂粗粒率2.75、比重2.57、吸水率1.10%であり、粗骨材は安山岩系砕石（最大寸法25mm、粗粒率6.93、比重2.71、吸水率0.49%）を使用した。実験の一部においてはCSA系膨張材Xを30kg/m³使用した。用いた収縮低減用混和剤（以下低減剤と略称する）は表-1に示す5種類のものであり、いずれも水に分散、あるいは溶解して希釈液の表面張力を大幅に低下させる機能を有する。

表中、5%希釈液の表面張力をCBVP式表面張力計によって測定した結果も示されている。低減剤の種類にもよるが、表面張力は無添加の場合の50%弱程度までに減少する例が認められるのである。表-2は、セメントペーストを試料とした実験シリーズIおよびコンクリートを対象としたIIシリーズの配合条件を示した。セメントペーストで水セメント比W/C=30%としたのは、均質な試料を得るためにあった。コンクリートにおいては、W/C=55%で、単位水量を157kg/m³と一定としたAE減水コンクリートを基本としたのは、通常使用される配合に近いもの

表-1 使用した低減剤の性質

種類	外観	比重	粘度	PH	標準量	特徴	表面張力
A	青色透明 液状	1.00 (20°C)	約20cps (20°C)	6 (1%水溶液)	7.5kg/m ³	水に易溶	34.5
B	低粘透明 液状	0.98 (20°C)	16cps (20°C)	6±1 (1%水溶液)	12kg/m ³	水に易溶	47.8
C	無色～淡色 液状	1.02±0.02 (20°C)	100±20cps (20°C)	7±1	セメント重量の 2~6%	水に易溶	37.0
D	淡黄色の 液状	1.04	—	—	セメント重量の 1~3%	水に難溶 (消泡効果)	38.8
E	白色乳化液	約1.05 (20°C)	50cps (25°C)	4.5~7	セメント重量の 1%	水に分散 (樹脂系)	36.2

表-2 試験に用いた配合条件

試料	骨材最大 寸法(mm)	W/C (%)	W (kg/m ³)	1) $\eta_{10} \text{ (mPa s)}$ or 2) ブラック(cm)	air (%)	低減 剤 使用
セメントペースト (I)	—	30	477	1) 無添加 190 2% — 185 6% — 205 6% — 145 200	EIは 空気 運行	2.6 %
				2) 8±1		
コンクリート (II)	25	55	157	4.5% DIは 非運行	3.75, 7.5 kg/m ³ E: 2.85, 4.3 kg/m ³	

で、低減剤の効果を比較し易くするためである。低減剤D使用の場合においては、消泡効果のためか空気連行せず、そのため高性能減水剤を用いてスランプを調整した減水コンクリートとした。また、E使用の場合はそれ自身空気連行性があるため、空気調整剤は使用しなかった。

2-2 試験方法

(1)セメントペーストの収縮試験：セメントペーストを試料としたシリーズIの実験においては、 $1 \times 1 \times 16\text{cm}$ の棒状供試体を作製し、材令7日より調湿剤により所定の湿度に保たれたデシケーター内で収縮試験

および重量変化試験を実施した。この際、20, 45, 58, 79および90%の相対湿度が得られるよう各種調湿剤を選定した³⁾。なお、測定期間は平衡に近い状態を得るために60日間とした。収縮量は、棒状供試体の両端部に埋設された一对のゲージプラグ間の距離を $1/1000\text{mm}$ 読みのダイヤルゲージで測定した。また、重量変化の測定は 1mg 感量の自動天秤によって行っている。

(2)コンクリートの収縮ひびわれ試験：コンクリートを用いたシリーズIIの実験においては、表-3に示すような組合せで実験を実施した。低減剤の種類や使用方法（混和或は含浸）、膨張材使用の有無、さらには外部拘束装置の拘束鋼材面積を变量とした計22種類の組合せとなっている。試験項目としては、図-1に示すような中央部 $10 \times 10\text{cm}$ 断面、直線部 30cm の外部拘束装置を用い、拘束鋼材とコンクリートのひずみ、初ひびわれ及び貫通ひびわれの日数、ひびわれ幅、収縮応力などを測定した。 $10 \times 10 \times 30\text{cm}$ 直線部を擬して $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 供試体による自由収縮試験も併行した。また、力学的特性、特にひびわれ発生時の引張強度も円柱供試体により測定している。試験は、材令7日まで散水養生した供試体を用いて行った。低減剤は表-3のように、所定量添加した場合と、Aでは特に刷毛塗りによって含浸（材令5日で実施）させた場合の2通りの使用方法を検討した。測長には検長 250mm 、 $1/1000\text{mm}$ 読みのホイットモアひずみ計とコンタクトゲージを併用した。ひびわれ幅は、 $1/20\text{mm}$ 読み測微鏡とコンタクトゲージを併用した。外部拘束装置の計画拘束率を $A_s \cdot E_s / (A_c \cdot E_c + A_s \cdot E_s)$ で概算すると $n = 15$ で $A_s = 8.8\text{cm}^2$ で約57%、 $A_s = 21.7\text{cm}^2$ で約76%、 36.5cm^2 で約85%程度となる。

3. 結果および考察

3-1 セメントペーストの乾燥収縮に及ぼす低減剤使用の影響

(1)ペーストの収縮および重量変化に及ぼす低減剤の影響：ペーストを試料として収縮量および重量変化に及ぼす低減剤の基本的な作用を把握するため実験を行った。 $1 \times 1 \times 16\text{cm}$ 棒状試験体による60日後の試験結果の一覧を表-4に示す。低減剤の種別による差は見られるが、全般に添

表-3 シリーズII（拘束ひびわれ実験）の試験組合せ条件

無	低減剤			膨張材 混和 kg/m ³		拘束鋼材 混和 kg/m ³		拘束鋼材 断面積 cm ²			試験組数
	混和	kg/m ³	含浸	cc/m ³	0	30	8.8	21.7	36.5		
○					○	○	○	○	○		3
○						○		○			1
E	E				○			○			2
C	C				○			○			2
B	B				○			○			2
A					○		○	○	○		3
	A				○			○			1
	A				○○			○			4
D					○		○	○	○		3
	D				○			○			1

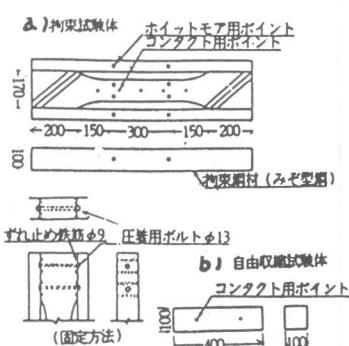


図-1 試験装置の概要（シリーズII）

加により収縮は低減していること、これに対し重量変化率は添加によって無添加と比べ等しいかやや増加傾向にあって、収縮低減が水分逸散の抑制により生ずるものでないことを示している。

図-2には、表の結果を用いて各低減剤ごとに無添加に対する収縮比率を求め、相対湿度20, 45, 58および79% R.H. の4ケースごとにそれら関係を示したものである。これより、低減剤の収縮低減効果は20~45%R.H.程度の中湿度領域で大きく、79%R.H.程度と高湿度環境では薄れる傾向にあるようである。図中、低減剤種別では、Aが最も効果的といえ、添加率2%対C量で4割、6%で6割弱の低減効果を示す。これに対し、Eは場合によっては低減効果を期待し得ないこと、DはAに匹敵する効果を有するが、Cでは湿度条件や使用量により変動がみられることがわかった。

図-3は相対湿度と60日後の平衡収縮量 ϵ_{sh} の関係を示した例である。これによると、湿度の低下と共に収縮は直線的な増加傾向にあるが、無添加の収縮は従来と同様45~20%R.H.で横ばいとなる傾向にある。低減剤使用では58%R.H.以下で横ばいとなり、ほぼ一様な収縮を示す限界の湿度の幅が高湿度側に移っていることがわかる。これは低減剤使用による収縮の内部機構の変化を伺わせるものである。

図-4は収縮量 ϵ_{sh} と重量減少 W' (mg/ccペースト)の関係の一例を描いたものである。低減剤使用の場合同一水量が逸散しても収縮が小さいこと、また上述の収縮が横ばいとなる湿度条件でも重量減は湿度の低下と共に確実に増加しており、収縮発現の原因が上記湿度を境に変化していることが推察できる。なお、E使用の場合では他の低減剤とかなり様相を異にするが、乾燥による樹脂のフィルム形成や微気泡導入により、ポアの分布が変化していることが考えられる。

(2)ペーストの収縮低減の機構に関する一検討：既に一種の低減剤についてはその作用機構に関し佐藤ら³⁾の詳細な報告があり、低減剤の効果は毛細管凝縮理論で説明しうることが明かにされているが、他の低減剤については未検討であり、これ

表-4 ペーストの収縮および重量変化試験結果の一覧

R.H. (%)	種別 control	A		B		C		D		E	
		2%	6%	2%	6%	2%	6%	2%	6%	2%	6%
20 1)	*	278	153	120	176	155	237	140	175	126	163
	**	185	179	181	201	208	181	196	180	137	178
45 2)	*	238	123	82	152	139	180	106	150	100	193
	**	121	125	151	136	156	130	157	128	113	123
58 3)	*	181	125	74	144	137	191	100	156	100	172
	**	90	109	132	108	120	110	131	98	100	183
79 4)	*	135	102	60	111	106	154	80	117	71	140
	**	37	40	82	52	50	85	54	49	49	110
90 5)	*	80	30	29	41	35	89	49	48	25	56
	**	7	4	51	12	15	12	38	23	23	30
(水) (100)	*	-29	-35	-27	-37	-23	-24	-24	-23	-26	-12
	**	-25	-25	-26	-26	-22	-25	-24	-25	-10	-38

1) CH_3COOK 2) KNO_2 3) $\text{N}_2\text{B}-2\text{H}_2\text{O}$ 4) NH_4Cl 5) $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

* 収縮 ($\times 10^{-5}$)

** 重量減少 (mg/ccペースト)

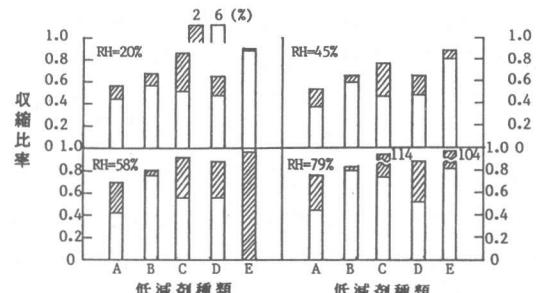


図-2 収縮比率と低減剤種類、添加量の関係

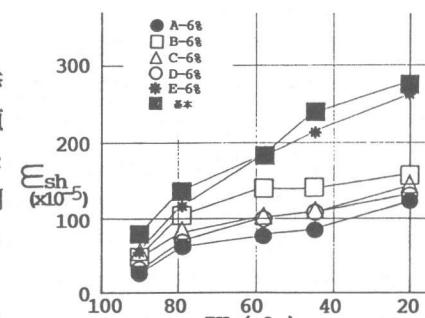


図-3 平衡収縮量と相対湿度の関係

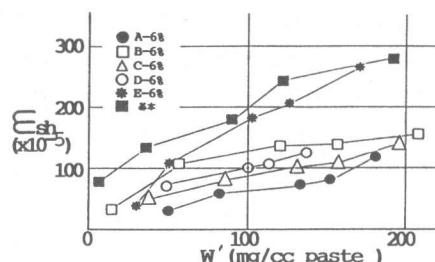


図-4 平衡収縮量と重量減少の関係

について情報を得ることは有益である。毛細管凝縮理論に従えば、乾燥により表面張力 γ を持つ液体の液面が後退し主曲率半径 r_1 、 r_2 のメニスカスを形成した場合の負圧 ΔP は、

$$\Delta P = -\gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{--- (1)}$$

水分凝縮に関し熱力学的平衡を仮定すると、

$$\Delta P = \frac{RT}{MV_f} \ln \left(\frac{P}{P_s} \right) \quad \text{--- (2)}$$

[R: ガス定数、T: 絶対温度 (K)
M: 分子量、V_f: 比容積 P/P_s: 相対湿度]

負圧により発生する内部応力 σ_{cp} は W_v を体積含水率 (残留水率) として

$$\sigma_{cp} = W_v \cdot \Delta P \quad \text{--- (3)}$$

乾燥収縮 ϵ_{sh} は近藤によれば内部応力を動弾性率で除した値に匹敵する^{3, 4)}。従って、弾性的性質に大きな相違がなく、任意の径の小孔ごとに残留する水分量は低減剤添加により変化しない、即ち、細孔分布と量に大きな変化がなければ、 ϵ_{sh} は表面張力 γ に比例することになる。

表-5は、用いた低減剤を対C量2%となるよう希釈した溶液の表面張力を測定し、これがペースト中の間隙水のそれと同一であると仮定して(1)および(2)式により求めた細孔半径 r (Å)を示す。表面張力 γ の低下に比例して同一湿度の細孔半径 r は減少する。

図-5は、各供試体ごとに試験終了後、2日間105°C乾燥をした時の重量減少を基準として求めた残留水分 W_v と上記細孔半径 r (Å)との関係を添加率2%について描いてみたものである。これによると無添加供試体の W_v は同一 r (Å)で最小となる傾向にあるが、Eを除けば基本的に添加、無添加で $W_v \sim r$ 分布に大差ないと判断した。図-6は、実測の収縮量 ϵ_{sh} とその湿度に対応する細孔半径 r (Å)の関係を描いたもので、無添加の収縮量を表面張力 γ の低下分だけ減少させた収縮量も比較のため鎖線で載せてある。これによると低減剤A, B, Dを用いた場合は理論値とよく合致しており、この機構がほぼ毛管張力理論で説明しうることを示すものと思われる。E及びC使用の場合、上記のような一致はみられない。この原因として前者では樹脂の特性が、後者では希釈液と実際のペースト中の溶液の表面張力が一致しないためではないかと思われるが、今後検討を要する。

3-2 コンクリートの収縮ひびわれ低減に関する検討

(1)コンクリートの力学特性および乾燥収縮に及ぼす低減剤の影響：表-3に示す実験計画に従ってコンクリートの品質に及ぼす低減剤の影響を検討した。図-7は、各種低減剤を用いたコンクリートの力学的性状を湿潤状態で試験した結果を示す。これによると、低減剤BおよびCを混

表-5 表面張力と平衡時の細孔半径の関係

	CONTROL	A 2%	B 2%	C 2%	D 2%	E 2%
表面張力	72.8	32.6	46.3	36.0	38.4	35.5
RH _{100%}	(100)	(44.8)	(63.6)	(49.4)	(52.7)	(48.8)
9.0	102.2	45.8	65.0	50.5	53.9	49.8
7.9	45.7	20.5	29.1	22.6	24.1	22.3
5.8	19.8	8.9	12.6	9.8	10.4	9.7
4.5	13.5	6.0	8.6	6.7	7.1	6.6
2.0	6.7	3.0	4.3	3.3	3.5	3.3

表面張力 (dyn/cm)

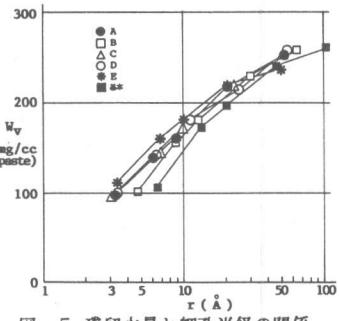


図-5 残留水量と細孔半径の関係

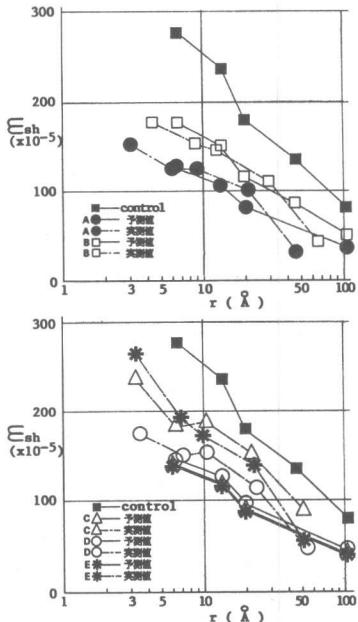


図-6 乾燥収縮と細孔半径の関係

和した場合10~20%程度初期強度は低下する様子にあるが、材令の経過と共に改善される傾向ある。また、D使用の場合には空気連行しないため、20~30%程度増加する傾向にあり、他はほとんど添加の影響は少ない。従って、D使用を除けば低減剤の通常の使用が力学性状に及ぼす影響は少ないものと思われる。

図-8には、乾燥収縮試験の結果をE使用では 4.3kg/m^3 、他は 7.5kg/m^3 使用の場合で示したものである。これによると、低減剤の種類による低減効果の順位は、 $D \geq A > C > B > E$ であって、セメントペーストの結果とはDとAの順序の違い以外は同様となっている。低減率も最大40%強と、ペーストでの低減効果がほぼ保持されている。DとAの逆転は、ペーストとコンクリートのセメント量の相違などが係わっていると考えられる。しかし、低減剤混和コンクリートの収縮も本質的にはペーストの低減機構と同じメカニズムで減少するものと考えられる。

(2)コンクリートの収縮ひびわれ性状に及ぼす低減剤の影響：図-9および図-10には、図-1に示す拘束試験装置によるひびわれ試験により得られた貫通ひびわれ発生日数Tと低減剤添加量(混和)および塗布含浸量の関係を示す。低減剤使用量と

貫通ひびわれ発生日数の間には明瞭に正の直線関係が認められる。同一混和量の場合、Dを用いた場合に最もひびわれ発生遅延効果が期待できるが、生産者の仕様に示される標準使用量(低減剤A- 7.5kg/m^3 、B- 12kg/m^3 、C- 4% 対C量、D- 2% C量、E- 1% C量)でみるとEおよびBを除いて実質的な差はない。Bおよび

Eでは、乾燥収縮低減効果の小さいことや、ポリマーの効果発現の遅速が係わっていると考えられる。Aを塗布含浸させた場合、膨張コンクリートをベースとすれば相当に有效であるが、常用コンクリートでは 300cc/m^2 含浸と $2\sim3\text{kg/m}^3$ 混和とが効果的にはほぼ等しく、実用性にやや欠ける面がある。

図-11は拘束装置の拘束鋼材断面積、即ち外部拘束の大きさを変えた場合について、貫通ひびわれ発生日数と、その時点の拘束ひずみ量、即ち自由ひずみ量と拘束されたコンクリート部のひずみとの差、 $\Delta\varepsilon$ の関係を示した。無添加コンクリートに対し、低減剤AおよびD 3.75kg/m^3 混和使用の場合のひびわれ低減効果は、拘束鋼材の面積の大小に拘らず維持され、

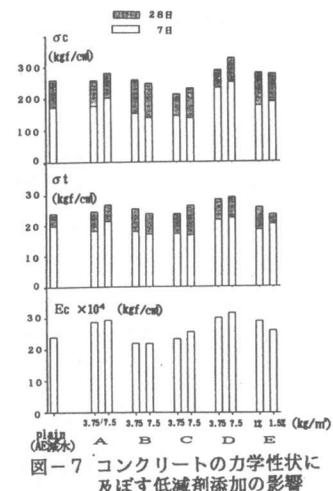


図-7 コンクリートの力学性状に及ぼす低減剤添加の影響

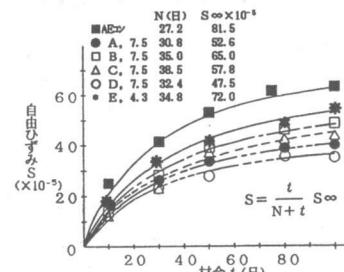


図-8 低減剤添加コンクリートの乾燥収縮性状

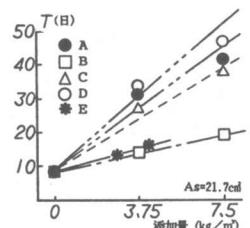


図-9 貫通ひびわれ日数と低減剤添加率の関係

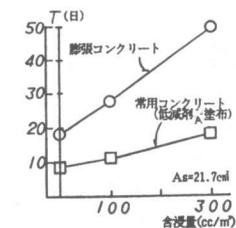


図-10 貫通ひびわれ日数と低減剤含浸量の関係

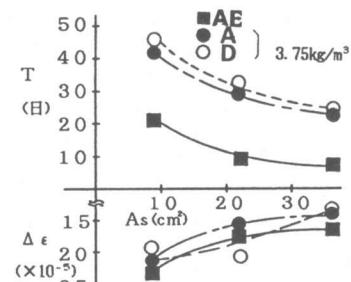


図-11 拘束鋼材面積の異なる条件下のひびわれ性状に及ぼす低減剤の影響

拘束ひずみ量 $\Delta \epsilon$ も無添加と同様に変化している。筆者らは既に次式をひびわれ日数算定式として提案している¹⁾。

$$T = \Delta \epsilon \cdot (a + b \cdot Q) \quad \text{--- (4)}$$

a, b は定数、とくに b は低減剤に依存した値をとり、Q は添加量である。従って $\Delta \epsilon$ を拘束鋼材の関数として表示し得れば、ひびわれ発生の予測も可能といえる。

図-12には、貫通ひびわれ発生後1カ月のひび割れ幅と各低減剤添加量との関係を示す。ひびわれ幅は材令と共に増加し、その速さは乾燥収縮の速さと関連する。また、最終的なひびわれ幅は収縮の大きさに依存するが、低減剤の使用はひびわれ幅の抑制に極めて有効であり、0.1mm程度に抑えうることが期待できる。

図-13には、乾燥により拘束装置のコンクリートに生じた収縮応力 σ_{sh} を以下の式より求めた結果が示されている。 ϵ_s を鋼材ひずみ、 A_s 鋼材面積、 A_c をコンクリート面積として、

$$\sigma_{sh} = \epsilon_s \cdot A_s \cdot E_s / A_c \quad \text{--- (5)}$$

収縮応力はまた次式でも概算できる。

$$\sigma_{sh} = \Delta \epsilon \cdot E_s / (1 + \psi) \quad \text{--- (6)}$$

低減剤の使用により、収縮応力の立ち上がりおよび進行共に緩慢となり、ひびわれ発生が遅延する原因がわかる。最大応力発生時のクリープ係数 ψ を(6)式より逆算してみると、図上に示したように無添加コンクリートも、低減剤添加コンクリートも 1. 1 前後と大差ない結果となった。他の実験で低減剤添加はクリープも減少させることができているが¹⁾、低減剤の大幅な収縮低減効果とクリープの速い進行によって収縮応力の効果的な緩和がなされていると考える。

4.まとめ

ペーストおよびコンクリートを試料として、乾燥収縮および外部拘束ひびわれ試験を実施し、5種類の低減剤の収縮ひびわれ低減効果を検討した。得られた結論は以下のようである。

- (1) 低減剤によるペーストの乾燥収縮低減効果は、低減剤の種別により異なるが、最大 2% 対 C 量添加で約 4 割、6% 対 C 量で 6 割弱の効果を示すものがあった。
- (2) 低減剤の収縮低減効果は逸散水の減少により得られるものでなく、大部分は表面張力の低下による影響を考慮に入れた毛細管張力機構により説明しうると考えられる。
- (3) コンクリートの力学特性は低減剤の通常の使用量の範囲では無添加と大差ない。
- (4) コンクリートの乾燥収縮に及ぼす低減剤の影響はペーストの場合とほぼ同様であった。
- (5) 低減剤の添加により確実にひびわれ発生を遅延し、ひびわれ幅を減少しうる。ここで検討した A, C および D の代表的 3 種類は標準使用量ではほぼ同程度のひびわれ低減効果を有することがわかった。これに関し大幅な収縮低減に加えクリープが効果的に作用するためと考えられた。

参考文献

- 1) 庄谷征美、杉田修一、菅原隆：特殊混和剤によるコンクリートの収縮ひびわれ低減効果について、セメント技術年報39、1985、PP.376～379
- 2) 庄谷征美、杉田修一、菅原隆：混和剤によるコンクリートの収縮ひびわれ低減に関する2、3の実験、土木学会第42回年次学術講演会、講演概要V部、1987、PP.84～85
- 3) 佐藤健、後藤孝治、酒井公式：セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤の作用機構、セメント技術年報37、1983、PP.65～68
- 4) 近藤実：硬化セメントペースト中の水の3形態と乾燥収縮、強さ、動弾性係数の関係、セメント技術年報X I、1957、PP.247～255

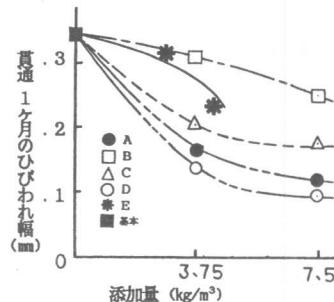


図-12 ひびわれ幅と低減剤種類の関係

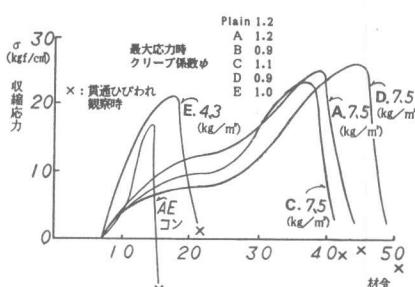


図-13 収縮応力の発現に及ぼす低減剤の影響と最大応力時のクリープ係数 ψ